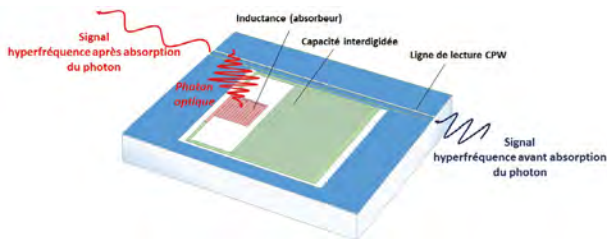


# MKIDs : NOUVEAUX DÉTECTEURS SUPRACONDUCTEURS ULTRASENSIBLES POUR L'ASTRONOMIE

Faouzi BOUSSAHA<sup>1,\*</sup>, Jie HU<sup>1</sup>, Jean-Marc MARTIN<sup>1</sup>, Christine CHAUMONT<sup>1</sup>, Paul NICAISE<sup>1</sup>, Piercarlo BONIFACIO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEPI – Observatoire de Paris, Université PSL, 77 avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France

\*faouzi.boussaha@obspm.fr



Dans cet article, nous présentons les MKIDs, pour « Microwave Kinetic Inductance Detectors », une nouvelle technologie de détecteur supraconducteur ultrasensible capable de détecter le photon et permettant de couvrir un large spectre électromagnétique allant des ondes millimétriques-submillimétriques aux rayons gamma, en passant par l'optique.

<https://doi.org/10.1051/phys/202211746>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Inventé au début des années 2000, les MKIDs sont actuellement l'une des technologies de capteurs supraconducteurs les plus prometteuses, capables de répondre à de nombreuses applications en astronomie et en physique. Dans le visible et le proche infrarouge, ils présentent de nombreux avantages comparativement aux capteurs semi-conducteurs à base de CMOS et CCD. Puisqu'ils sont capables de simultanément compter les photons et de mesurer leurs énergies,

il est notamment beaucoup plus facile de construire des spectrophotomètres sans le recours aux éléments optiques tels qu'un prisme ou un réseau diffusant pour diviser la lumière, induisant une perte de photons. Or, en astronomie, particulièrement lorsqu'il s'agit de détecter des objets à ultra-faible intensité, chaque photon compte ! En termes de bruit, contrairement aux détecteurs semi-conducteurs, y compris lorsqu'ils sont refroidis, les détecteurs MKIDs ne souffrent ni de bruit de lecture ni de bruit

de courant d'obscurité. Un autre atout majeur des MKIDs concerne la grande vitesse de lecture de l'ensemble des pixels d'une matrice qui peut être réalisée en temps réel, facilitant par exemple l'observation et l'étude de phénomènes transitoires rapides tels que les sursauts gamma, les binaires à éclipse, etc. Ceci est difficilement réalisable avec les CCD et les CMOS qui sont beaucoup plus lents. Avec la même caméra, les MKIDs permettent aussi de couvrir une plus large bande de longueurs d'onde allant de 0,1  $\mu\text{m}$

jusqu'à 5  $\mu\text{m}$ , quand une caméra CCD ne peut couvrir au mieux jusqu'à environ 1  $\mu\text{m}$ .

Comme illustré sur la figure 1, un détecteur MKID est un résonateur de type LC se caractérisant par un grand facteur de qualité ( $>10^5$ ) qui se traduit par une très fine résonance. Sa fréquence est donnée par  $f_r = 1/2\pi\sqrt{(L_{geo}) + (L_{cin})C}$  où  $L_{geo}$  est l'inductance géométrique produite par l'énergie magnétique emmagasinée dans le supraconducteur et ne dépend que de sa géométrie et  $L_{cin}$  est l'inductance cinétique qui représente l'élément clé de la détection.  $L_{cin}$  se manifeste lorsqu'en présence d'un champ électromagnétique alternatif, les paires de Cooper, acquièrent une énergie cinétique, mais avec un retard dû à leur inertie. Pour rappel, une paire de Cooper est formée de 2 électrons qui au lieu de se repousser, se lient par l'intermédiaire du réseau cristallin à partir d'une certaine température appelée température critique  $T_c$ . Ceci est la base de la supraconductivité. L'inductance cinétique est donnée par  $L_{cin} = \rho\hbar/\Delta t$  où  $\rho$  est la résistivité de la couche supraconductrice,  $\Delta$  est le gap d'énergie du supraconducteur et  $t$  est l'épaisseur de la couche mince. La détection est réalisée lorsque l'inductance cinétique est modifiée par l'absorption d'un photon incident dont l'énergie est supérieure à l'énergie de liaison des électrons de paires de Cooper, donnée par  $2\Delta \approx 3,5K_B T_c$  où  $K_B$  est la constante de Boltzmann et  $T_c$  est la température critique du supraconducteur, la température critique séparant l'état normal de l'état supraconducteur. Ceci conduit à la brisure des paires de Cooper en quasiparticules. Dans ce cas, la densité des quasiparticules augmente et celle des paires diminue. L'inductance cinétique étant inversement proportionnelle à la densité des paires, la fréquence de la résonance se déplace alors vers les basses fréquences. Cet effet est accompagné par la modification de la phase et l'élargissement de la résonance qui traduit une dégradation du facteur de qualité à cause

de l'augmentation des pertes dans le circuit. En évaluant le décalage de la fréquence  $\Delta f$ , il est possible de remonter à l'énergie des photons absorbés. Le résonateur est couplé à une ligne de lecture qui a la double fonction d'exciter le résonateur grâce à l'application d'un signal hyperfréquence et de mesurer sa résonance.

Il existe principalement deux géométries permettant la définition des résonateurs LC pour faire des détecteurs MKIDs. Une géométrie qui utilise une ligne de transmission coplanaire quart d'onde ( $\lambda/4$ ) dont une extrémité est ouverte pour définir la partie capacitive et l'autre court-circuitée afin de définir la partie inductive. Le premier démonstrateur MKID réalisé en 2003 était basé sur cette géométrie. La deuxième géométrie utilise des éléments localisés où l'inductance en forme d'un méandre est parallèlement connectée avec une capacité interdigitée, comme montré sur la figure 2. Contrairement à la géométrie quart d'onde qui est difficilement applicable en dehors d'une certaine longueur d'onde, cette seconde géométrie, appelé Lumped Element KIDS (LEKIDS), convient particulièrement à l'optique. En modifiant la valeur de la capacité, il est ainsi possible de multiplexer dans le domaine fréquentiel un grand nombre de résonateurs à une seule ligne de lecture, généralement une ligne coplanaire CPW de 50  $\Omega$ , permettant la mise en œuvre de caméras comportant plusieurs milliers de pixel. Les valeurs des capacités et de l'inductance cinétique doivent être judicieusement choisies afin de maintenir des fréquences de résonance suffisamment basses, typiquement de quelques GHz, facilement mesurables avec une électronique de lecture peu coûteuse et aisée à mettre en œuvre.

Les premières caméras MKIDs optiques ont été développées et déployées sur des télescopes par l'Université de Californie à partir de 2013. L'instrument ARCONS [2] utilisant une caméra de 2024 pixels, fut le premier démonstrateur qui a été déployé avec succès sur le télescope Palomar ●●●

# OPTICAL INSTRUMENTS

## NEW & REFURBISHED



OSA  
OTDR  
Attenuators  
Source | Amplifier  
Fiber fusion splicer  
BERT (NRZ, PAM4...)  
Power meter  
DSO | DSA  
Controller

And much more ...



## FOR MORE INFORMATION CONTACT US

+33 2 96 48 20 02  
commercial@fc-equipments.com

www.fc-equipments.com



FC EQUIPMENTS  
12, rue Thomas Edison  
22 300 LANNION  
FRANCE

de 5 m en 2011. ARCONS a démontré une résolution de  $R=10$  à 400 nm et fonctionnait dans la bande 400-1100 nm. Dans l'objectif d'augmenter le nombre de pixels et d'améliorer les performances intrinsèques des détecteurs, plusieurs versions de caméras ont par la suite vu le jour. Il y a eu l'instrument DARKNESS [3] en 2016 qui, en termes de conception, est presque une réplique exacte d'ARCONS mais comptabilisant un plus grand nombre de pixels (10 000 pixels), puis l'instrument MEC [3] qui à partir du télescope SUBARU à Hawaii, a pour objectif de réaliser l'imagerie directe des exoplanètes dans la bande 800-1400 nm avec une résolution spectrale de  $R=15$ , en utilisant une caméra MKIDs de 20 000 pixels.

À l'Observatoire de Paris, nous développons SPIAKID (Spectro Photometric Imaging in Astronomy with Kinetic Inductance Detectors), un nouvel instrument dédié à l'observation et l'étude des galaxies naines à très faible intensité appelées UDFs pour Ultra-Faint Dwarfs, dans le Groupe Local. Dans ces systèmes âgés de plus de 10 milliards d'années, les étoiles sont la population dominante et la fraction d'étoiles extrêmement pauvres en métaux, donc très anciennes, est beaucoup plus élevée que dans

les galaxies naines classiques qui sont plus lumineuses. Les étoiles constituant les galaxies seraient nées entre 1 et 3 milliards d'années après le Big Bang. Pour étudier ces galaxies et établir leurs natures ainsi que leurs populations stellaires, nous avons besoin d'une photométrie ainsi que d'une spectroscopie des étoiles dans une large bande spectrale. Comme mentionné plus haut, les MKIDs sont capables d'effectuer une spectrophotométrie sans le recours à des éléments optiques. Le spectro-photo-imageur SPIAKID couvrira une large bande allant de 400 à 1600 nm et utilisera à terme une mosaïque de 4 matrices de 20 000 MKIDs chacune.

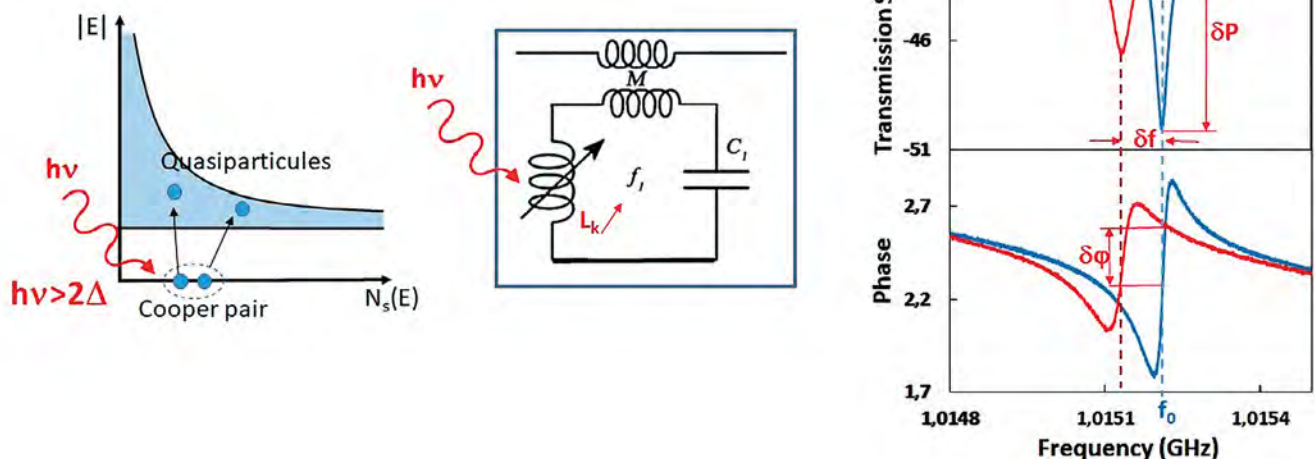
#### DÉVELOPPEMENT DES DÉTECTEURS MKIDS OPTIQUES À L'OBSERVATOIRE DE PARIS

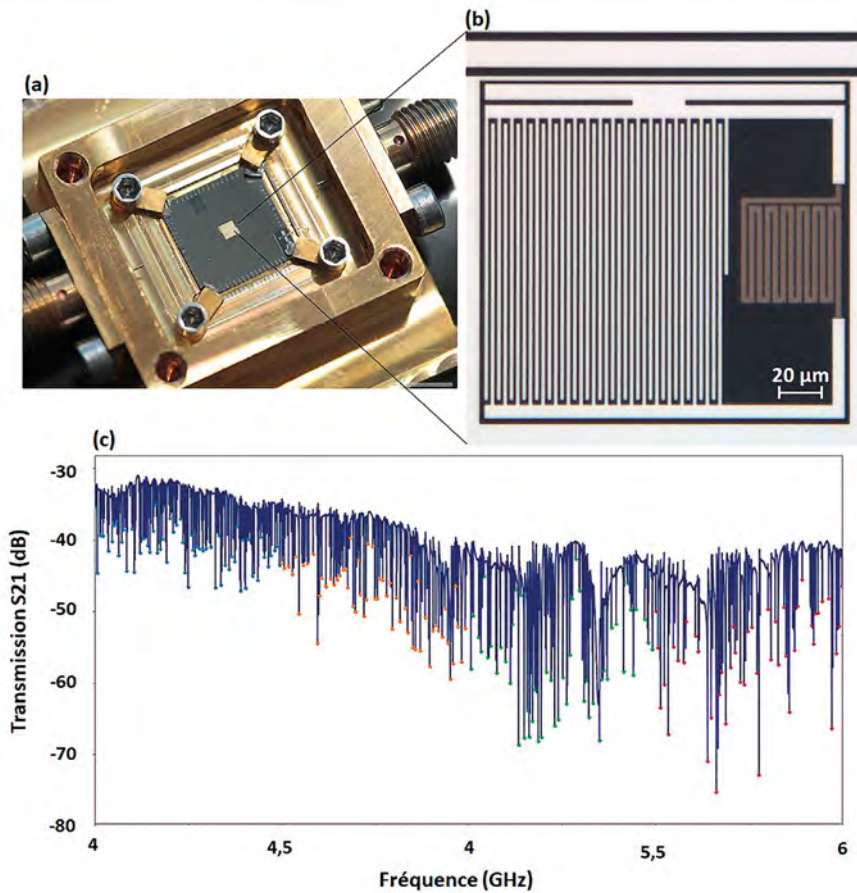
La figure 2 montre la photo d'un des LEKIDs en cours de développement à l'Observatoire de Paris. Le résonateur ainsi que la ligne de lecture sont réalisés à partir de couches minces supraconductrices dont la

mise en œuvre constitue, actuellement, à lui seul un axe de recherche important pour atteindre les performances ultimes particulièrement dans l'optique et le proche infrarouge. Le méandre inductif de  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$  est réalisé à partir d'une couche mince en nitrure de titane (TiN) de quelques dizaines de nm, généralement entre 20 et 60 nm, d'épaisseur. Le TiN est obtenu par nitruration du Ti pendant le dépôt par la technique de pulvérisation cathodique.

Quant à la ligne de lecture, elle est généralement définie à partir d'une couche de niobium (Nb) d'une centaine de nm d'épaisseur. Contrairement à l'aluminium ( $T_c = 1.2\text{K}$ ), le supraconducteur le plus largement employé dans le millimétrique-submillimétrique, le TiN présente, d'une part, une inductance cinétique élevée facilitant la définition de résonateur de faible taille de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de côté, résonant à des fréquences ne dépassant pas les quelques GHz, et d'autre part, une impédance de surface aussi élevée facilitant le

**Figure 1.** Un photon incident, lorsqu'il est absorbé par la couche mince supraconductrice (a), brise les paires de Cooper et modifie son inductance de surface, induisant par conséquent la modification de la fréquence propre  $\delta f$  et de la phase  $\delta\phi$  du résonateur LC.





**Figure 2.** (a) Image prise au microscope optique de la matrice LEKIDS de 1000 pixels. (b) Image d'un MKID isolé, optimisé pour résonner à  $f_0 = 4$  GHz. (c) Paramètre de transmission  $S_{21}$  de la ligne de lecture CPW montrant la présence d'environ 900 résonances sur 1000 attendues, mesurées à 50 mK avec un signal hyperfréquence appliqué à la ligne avec une puissance de  $P_f = -100$  dBm (0.1 pW).

couplage de l'absorbeur à l'onde incidente évoluant dans l'espace libre. Le Nb, qui présente de très faibles pertes RF, est idéal pour réaliser la piste centrale ainsi que les plans de masse de la ligne CPW.

La figure 2-b montre l'image d'un MKID de  $136 \times 132$  µm appartenant à une matrice qui en comporte 1000. Ces derniers ont été optimisés pour résonner dans la bande fréquentielle 4-6 GHz. La température critique du TiN, qui peut varier entre 0.4 et 4.6 K en fonction de la quantité d'azote régissant avec le titane pendant le dépôt, a été optimisée à environ 1 K afin d'augmenter la sensibilité des détecteurs (la sensibilité des MKIDS étant

inversement proportionnelle à la  $T_c$ ). Sachant que les MKIDS commencent à fonctionner de manière optimale lorsqu'ils sont refroidis à  $T < T_c/10$ , la matrice a été refroidie à 50 mK dans un cryostat de type ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator). Les résonances sont excitées puis mesurées à travers la ligne CPW à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. La caractérisation consiste d'abord à mesurer la transmission directe  $S_{21}(f)$  afin d'identifier les résonances puis de vérifier leurs facteurs de qualité. Le paramètre de transmission  $S_{21}$  indique qu'environ 90% des résonances ont été observées dans la bande passante optimisée exhibant des facteurs de qualité ●●●

## Tailored solutions for high-precision fibered interferometry

From basic components (deep blue to 2.0µm)



- Delay fiber coils
- Phase shifter
- OD

Through smart integrations



- Stabilized MZI
- Passivated assemblies
- Accurate phase control loops

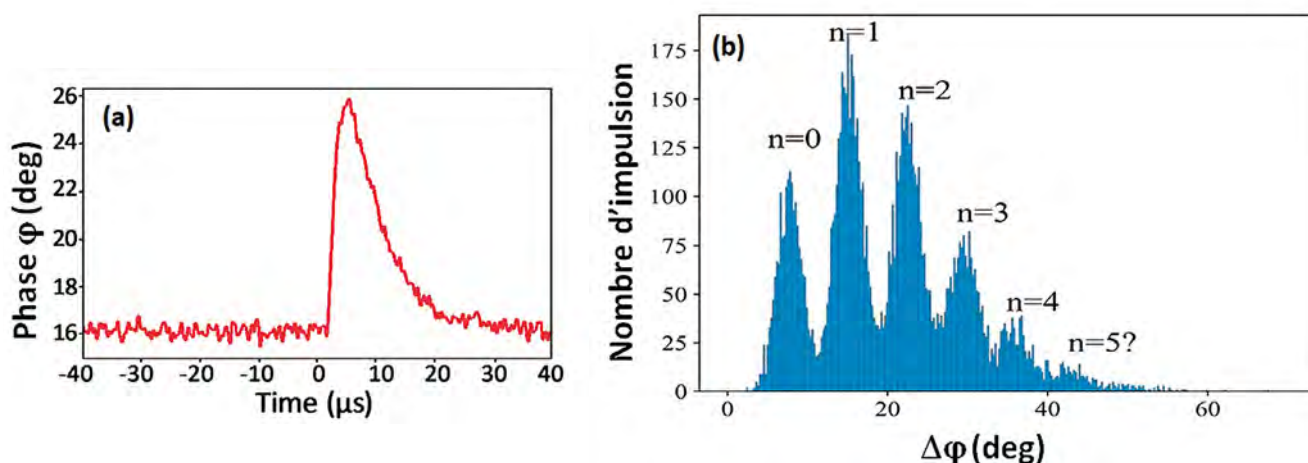
To high-end heterodyne systems for high-speed velocimetry purpose



- Contact-us for a demonstration!

**IDIL**  
FIBRES OPTIQUES

www.idil.fr



**Figure 3.** (a) Réponse temporelle de la phase du détecteur, après éclairage, permettant d'estimer le temps de vie des quasiparticules. (b) Réponses du MKID à un train d'impulsions courtes de très faibles intensités permettant de mettre en évidence le régime comptage de photons.

intrinsèques  $> 10^4$ . Afin de démontrer que les MKIDs sont capables de non seulement détecter les photons optiques mais de les compter aussi, la matrice est ensuite éclairée à  $\lambda=405$  nm avec une LED à travers une fibre optique dont la sortie est positionnée à 35 mm au-dessus des détecteurs. La figure 3-a présente la réponse du MKID dans le domaine temporel lorsqu'il est éclairé avec une impulsion de 100 ns. Cette mesure permet d'estimer le temps de vie des quasiparticules  $\tau_{qp}$  qui traduit le temps moyen nécessaire aux quasiparticules de se recombinaison de nouveau en paires de Cooper après absorption de photons. Il s'agit d'un paramètre important qui, d'une part, influe sur la sensibilité du détecteur à travers le bruit de génération/recombinaison et, d'autre part, détermine la dynamique de détection du détecteur. En effet, afin d'augmenter la sensibilité (en diminuant le bruit de génération/recombinaison), un  $\tau_{qp}$  élevé est donc préconisé. Cependant, il doit être suffisamment faible pour qu'après la détection d'un premier flux de photons, le détecteur revienne suffisamment vite à son état d'équilibre pour qu'il puisse détecter un nouveau flux.  $\tau_{qp}$  est estimé ici à environ 13  $\mu$ s. En fonction de la température critique du TiN, ce temps peut augmenter jusqu'à une centaine de  $\mu$ s. La figure 3-b montre la statistique d'impulsions en fonction de changement de phase suite

à l'absorption d'un ou de plusieurs photons, obtenue lorsque le MKID est éclairé de manière répétitive toutes les 4 ms avec une impulsion de 50 ns, dont l'amplitude est fortement atténuée. Nous constatons clairement l'absorption d'un ( $n=1$ ), de deux ( $n=2$ ), trois ( $n=3$ ) photons, etc. Le  $n=0$  n'est pas généré par l'absorption de photons mais par le bruit environnant le MKID auquel il peut être sensible. Davantage de détails sur cette étude peuvent être trouvés dans [5].

### CONCLUSION

Les détecteurs MKIDs offrent une technologie très prometteuse pour de nombreux applications

astronomiques. A l'Observatoire de Paris, nous avons développé avec succès les premiers détecteurs à inductance cinétique MKIDs optiques capables de détecter individuellement quelques photons. Etant relativement jeune, cette technologie continue néanmoins à faire l'objet d'importants efforts de recherche et développement tant au niveau national qu'international afin de répondre aux exigences très pointues des applications astronomiques. Plusieurs caractéristiques doivent en effet être investiguées et améliorées. C'est le cas, par exemple, de la résolution en énergie ainsi que de l'efficacité quantique qui est de l'ordre de 10-15%. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] P. K. Day *et al.*, *Nature* **425**, 817(2003)
- [2] B. A. Mazin *et al.*, *Astronomical Soc. Pacific* **125**, 1348 (2013)
- [3] S. R. Meeker *et al.*, *Astronomical Soc. Pacific*. **130**, 065001 (2018)
- [4] A. Walker *et al.*, *Proceedings 10702, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*; 107020V (2018)
- [5] J. Hu *et al.*, *Phonon Induced Response in Microwave Kinetic Inductance Detector Under Optical Illumination*, soumis (2022)